

На правах рукописи

Смирнов Артем Иванович



**СИСТЕМА АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ МАЛОЙ
МОЩНОСТИ**

**Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Степанов Сергей Федорович

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», профессор.

Захаров Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», институт энергетики, кафедра «Электроснабжения горных и промышленных предприятий», заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Защита диссертации состоится 29 декабря 2020 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Традиционная структура электроэнергетических систем такова, что электроэнергия вырабатывается на крупных генерирующих станциях, передается на большие расстояния, понижается до среднего или низкого уровней и распределяется к конечным потребителям. Несколько десятилетий такая структура энергетических систем оставалась неизменной. Однако, в последние годы повышается интерес к новым энергоэффективным технологиям производства электроэнергии.

В настоящее время во многих странах разработаны программы поддержки использования возобновляемых источников электроэнергии (ветровые, фотоэлектрические и др.). В России, например, это федеральный закон от 27.12.2019 N 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации» и постановление от 27 сентября 2018 года №1145 «О стимулировании использования возобновляемых источников энергии».

Широкое распространение получают системы, в которых к распределительной сети подключены различные типы небольших источников генерации электроэнергии, более известных как распределенная генерация. По данным отчета ЕЭС выработка электроэнергии в 2019 году ветроэлектростанциями увеличилась на 47,3%, а солнечными электростанциями на 69,4% по отношению к 2018 году. Положительная тенденция к дальнейшему увеличению количества возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме России обусловлена рядом объективных предпосылок, образовавшихся в результате развития энергетики: возрастающий дефицит сетевых и генерирующих мощностей на фоне высокого износа оборудования; ограниченность инвестиций, выделяемых на реконструкцию действующих объектов энергетики и строительства новых; необходимость обеспечения электроэнергией районов, удалённых от развитой сетевой инфраструктуры и др. В сложившихся условиях наиболее перспективным направлением развития энергосистемы России представляется переход к централизованной и распределённой энергетике.

Степень разработанности темы исследования

Интеграция распределенной генерации в электросеть приводит к значительным изменениям в распределительной сети, требующим решения целого ряда научных задач. Изменяются направления потоков мощности в линиях электропередач, возникают режимы качаний и асинхронные режимы из-за многостороннего электропитания, изменяются уровни токов короткого замыкания, нарушается качество электроэнергии. Проблема построения релейной защиты, минимизирующей последствия аварийных ситуаций и повторного их возникновения, расширяется и усложняется, что требует обеспечения эффективного функционирования токовой защиты электросети в новых условиях.

Принципы проектирования систем релейной защиты, используемые в распределительных сетях, были заложены в работах М.А. Шабада, А.И. Савастьянова, М.А. Берковича, Я.С. Гельфанда, Л.А. Плащинского и ряда других авторов. Вопросы интеграции распределенной генерации в энергосистему рассматривали Ю.Г. Шакарян, И.Н. Усачев, Н.И. Воропай, Л.С. Беляев и др. Различные аспекты электротехнических комплексов с распределенной генерацией также изучались в работах Б.Н. Абрамовича и О.Б. Шонина из Санкт-Петербургского горного университета. Влияние распределенной генерации на процессы, происходящие в электросетях в большей степени изучены в работах иностранных авторов P.H. Schavemaker, A. Schweer, F. Provoost, G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans и др.

Однако проработанность вопросов построения релейной защиты электроэнергетических сетей с распределенной генерацией остается недостаточной: не учитывается влияние вариативности параметров генерации электроэнергии на систему защиты электротехнических комплексов; существующие алгоритмы адаптивной защиты предполагают наличие таблиц с настройками параметров релейной защиты для возможных изменений структуры сети.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по пунктам: п.1 «Развитие

общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Объект исследования – электротехнический комплекс среднего напряжения 6(10) кВ с распределенной генерацией электроэнергии малой мощности.

Предмет исследований – адаптивная токовая защита при аварийных режимах в сетях с распределенной генерацией электроэнергии.

Цель работы – обеспечение чувствительности и надежности функционирования токовой защиты сетей среднего напряжения 6(10) кВ с распределенной генерацией электроэнергии малой мощности в условиях вариативности параметров генерации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать методики построения токовой защиты для традиционных электросетей.
2. Определить основные факторы, влияющие на работу токовой защиты в условиях распределенной генерации.
3. Разработать компьютерные модели электросетей с изолированной нейтралью, которые позволят оценить влияние распределенной генерации на токовую защиту и проверить адекватность работы алгоритмов адаптивной настройки реле.
4. Разработать алгоритм обеспечения селективности релейной защиты в условиях изменения структуры распределительной сети.
5. Разработать алгоритм, определяющий эквивалентное сопротивление между двумя любыми точками в распределительной электросети, который позволит рассчитывать токи короткого замыкания от нескольких источников электроэнергии.
6. Разработать алгоритм адаптивной токовой защиты, который учитывает вариативность вкладов в ток короткого замыкания источников распределенной генерации и изменяет настройки реле в соответствии с новыми условиями работы электросети.

7. Проверить адекватность разработанного алгоритма адаптивной токовой защиты на компьютерной модели в программе Matlab/Simulink.

Научная новизна работы:

1. Дополнительные принципы выбора точки подключения источников распределенной генерации электроэнергии, отличающиеся от известных введением учета параметров генерации и основанные на выявленных зависимостях вклада тока центральной энергосистемы от мощности распределенной генерации и её типа.

2. Принцип функционирования токовой защиты, отличительной особенностью которой является адаптивность токовых уставок и времени срабатывания, основанный на оценке параметров распределительной сети до возникновения межфазного короткого замыкания.

3. Алгоритмы управления настройками токовой защиты электросетей для минимизации необоснованных отключений распределённых источников электроэнергии, в основе которых лежит автоматическое определение последовательности срабатывания защит в соответствии с изменением направления потока мощности сети при изменении её структуры.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Разработаны технические решения по внедрению алгоритма адаптации уставок срабатывания токовой защиты.

2. Разработан алгоритм определения тока короткого замыкания в сетях с несколькими источниками электроэнергии на основе эквивалентных преобразований.

3. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета, а также алгоритм расчета токов короткого замыкания в сетях с несколькими источниками принят к внедрению в производственную деятельность ООО «Невский машиностроитель», что подтверждается соответствующими актом и справкой.

Методология и методы исследований. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с фундаментальными положениями теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты и автоматики, математического и имитационного мо-

делирования процессов, а также с применением вычисления параметров моделей и обработки результатов, выполненных в программно-вычислительном комплексе *Matlab/Simulink*.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Учет зависимостей тока центральной энергосистемы от изменения мощности распределенной генерации служит основой к дополнению существующих принципов обеспечения заданной чувствительности действия защиты при межфазных коротких замыканиях в сетях с наличием распределенной генерации электроэнергии.

2. Разработанные алгоритмы функционирования и настройки срабатывания адаптивной токовой защиты для сетей среднего напряжения, обеспечивающие автоматическую идентификацию неисправной секции электросети в условиях изменяющейся её структуры и распределенной генерации, повышают эффективность работы системы защиты по показателям чувствительности и селективности.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования. Адекватность методов, используемых в работе, подтверждается фундаментальными теориями исследования процессов при межфазных коротких замыканиях и применением современных и проверенных ведущими научно-исследовательскими организациями программно-моделирующих комплексов *Matlab*, а также обсуждением основных результатов работы в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: 68-я международная горно-металлургическая конференция «*Holistic Approach in the Mineral Industry*» – 2017, Фрайберг, Германия; международная конференция «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» – 2017, Новосибирск; Всероссийская научная конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» – 2017, Кемерово; Международная научная конференции по электроэнергетике «*International Scientific Electric Power Conference ISEPC*» – 2019, Санкт-Петербург; Международная научная конференция «*International Scientific Conference on Energy, Environmental*

and Construction Engineering» – 2019, г. Санкт-Петербург; российская конференция молодых исследователей в области электротехники и электроники «*IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering*» – 2019, г. Санкт-Петербург; VII Международная научно-практическая конференция «*Инновации и перспективы развития горного машиностроения: IPDME-2020*» – 2020, г. Санкт-Петербург.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; анализе работы токовой защиты в условиях распределенной генерации электроэнергии; проведении математического и имитационного моделирования аварийных режимов работы электроэнергетических систем среднего напряжения с источниками распределенной генерации различного типа в условиях изменяющейся структуры сети; обобщении и обработке экспериментальных данных; формулировке основных научных положений и выводов, а также в подготовке текстов научных публикаций и апробации основных положений работы.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 5 приложений. Диссертация изложена на 153 страницах машинописного текста, в том числе содержит 18 таблиц и 66 рисунков. Список цитируемой литературы включает 152 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены общая характеристика и структура электроэнергетических систем с распределенной генерацией (РГ). Подробно рассмотрены предпосылки, лежащие в основе использования РГ, влияние на существующие электрические сети, практические аспекты, касающиеся конечных пользователей, новые технологии и возможные области исследований. Исследование затронуло различные области энергетики, такие как типы РГ и их устройство, системы защиты электросетей, качество электроэнергии, токи короткого замыкания (КЗ) и их зависимости от новых условий работы электросети.

Заданы ограничения области диссертационного исследования. С учётом особенностей развития альтернативной энергетики в работе рассматриваются источники РГ суммарной мощностью до 10 МВт, подключенные как «напрямую» к сети 6-10 кВ, так и через преобразователь частоты. Задачи решаются для наиболее распространённой радиальной конфигурации распределительной сети с возможностью изменения её структуры.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе рассмотрены системы релейной защиты, используемые в традиционных распределительных сетях и влияние РГ на основную и резервную токовую защиту в режиме КЗ. Под системой релейной защиты понимается совокупность устройств релейной защиты на одном или нескольких энергообъектах, обеспечивающие выполнение функций отключения поврежденных участков.

Содержание второй главы раскрывает первое защищаемое положение.

Проведен анализ влияния на токовую защиту подключенных локальных электростанций параллельно с сетью. Традиционно основ-

ную роль в защите распределительных сетей от межфазных КЗ выполняют максимальная токовая защита и токовая отсечка. По этой причине влияние РГ на систему защиты необходимо рассматривать с точки зрения изменения токов КЗ.

Характерный фрагмент участка электросети с подключенной электростанцией к подстанции ПС-2 представлен на рисунке 1.

Для анализа влияния источника РГ на величину тока повреждения в фидере, берется общий фидер от подстанции ПС-1 до ПС-3, где на расстоянии L расположен источник РГ, а

вблизи подстанции ПС-3 имитируется трехфазное КЗ. После преобразований, ток трехфазного КЗ определяется уравнением (1):

$$I_{КЗ} = \frac{U_{ЭКВ} \cdot (Z_{ЭС} + D \cdot Z_{Л} + Z_{ГЕН})}{\sqrt{3} \cdot (D \cdot Z_{Л} (Z_{Л} - Z_{ЭС}) - D^2 Z_{Л}^2 + (Z_{Л} \cdot Z_{ГЕН} + Z_{ЭС} \cdot Z_{ГЕН} + Z_{ЭС} \cdot Z_{Л}))}, \quad (1)$$

где D – параметр удаления генератора относительно общей длины фидера L_0 от подстанции ПС-1; $U_{ЭКВ}$ – приведенное напряжение системы; $Z_{ЭС}$, $Z_{Л}$, $Z_{ГЕН}$ – полное сопротивление центральной энергосистемы, линии и электростанции. Уравнение (2) описывает вклад центральной энергосистемы в общий ток КЗ:

$$I_{КЗ_СЕТИ} = \frac{U_{ЭКВ} \cdot Z_{ГЕН}}{\sqrt{3} \cdot (D \cdot Z_{Л} (Z_{Л} - Z_{ЭС}) - D^2 Z_{Л}^2 + (Z_{Л} \cdot Z_{ГЕН} + Z_{ЭС} \cdot Z_{ГЕН} + Z_{ЭС} \cdot Z_{Л}))}. \quad (2)$$

Вклад центральной энергосистемы в ток КЗ будет определяться полным сопротивлением фидера, внутренними сопротивлениями энергосистемы и локальной электростанции, а также местом подключения генератора относительно общей длины фидера. Кроме того, влияние РГ на токи КЗ зависит от типа генератора и способа подключения к электросети.

На основе полученных уравнений выявлена связь между чувствительностью токовой защиты и выходной мощностью РГ.

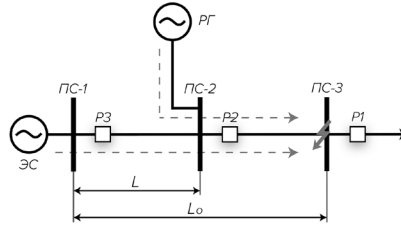


Рисунок 1 – Упрощенная схема участка электросети с распределенной генерацией

Для подтверждения выявленной связи была разработана имитационная модель участка сети с помощью программной среды Matlab/Simulink. К основному фидеру был подключен источник РГ мощностью 1 МВт. Исследование производилось как для случая подземного кабеля, так и для воздушной линии. В модели принято, что максимальная токовая защита обеспечивает основную защиту участка кабельной или воздушной линии до места подключения РГ и резервную защиту нижестоящего по потоку мощности участка.

В ходе исследования изменялось удаление подключенного ветрогенератора от начала фидера при сохранении общей его длины, что позволило оценить распределение вкладов в ток КЗ от центральной энергосистемы и генератора. Далее изменялась мощность РГ (3 МВт, 6 МВт, 9 МВт). На рисунке 2 показаны результаты измерения вкладов в ток КЗ от разных источников.

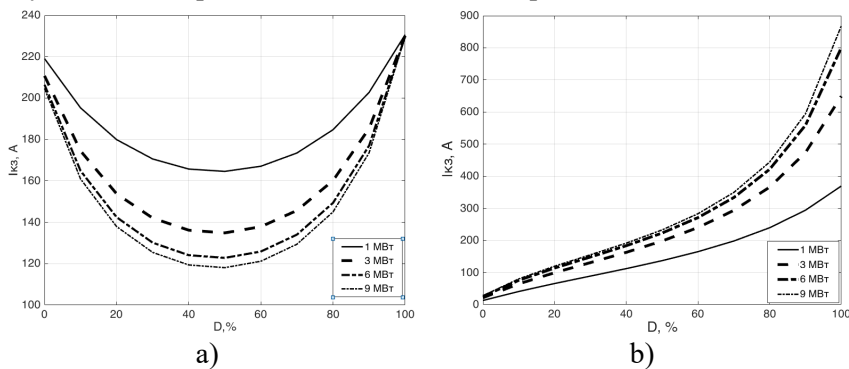


Рисунок 2 – Составляющие тока короткого замыкания:

а) от центральной энергосистемы; б) от источника распределенной генерации

Полученные результаты указывают на то, что максимальное снижение чувствительности резервной токовой защиты происходит, когда подключаемая электростанция находится в середине фидера и определяется из уравнения (3), которое позволяет определить относительное место подключения РГ D с максимальным влиянием на распределительную сеть:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_L^2 - X_L(X_L - X_{\Sigma C}) + jR_L(2X_L - X_{\Sigma C})}{(R_L^2 - X_L^2) - 2jX_LR_L}, \quad (3)$$

где R_L , X_L – параметры сопротивления линия; $X_{\Sigma C}$ – сопротивление энергосистемы.

Для исследования влияния мощности электростанции на вклад в ток КЗ от центральной энергосистемы в тестовой модели параметры линий установлены так, чтобы влияние РГ на ток КЗ было максимальным и производилось моделирование с увеличением мощности электростанции с шагом в 1 МВт до 60 МВт. На рисунке 3 представлены результаты моделирования.

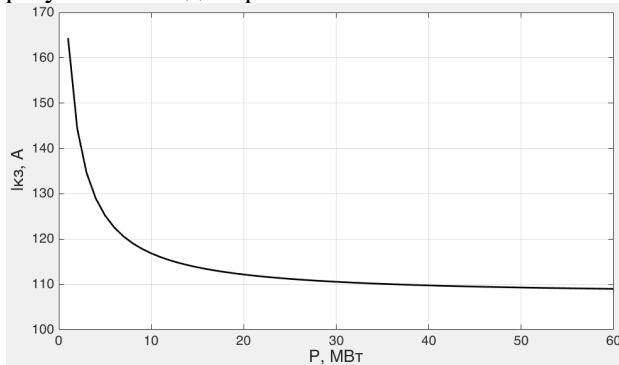


Рисунок 3 – Зависимость вклада в ток короткого замыкания энергосистемы от мощности распределенной генерации

Полученная зависимость показывает, что изменение тока короткого замыкания при изменении мощности местной электростанции оказывает наибольшее влияние в диапазоне до 10 МВт при постоянстве других параметров системы.

Для проведенного моделирования зафиксировано изменение коэффициента чувствительности на 73% при изменении мощности РГ от 1 МВт до 3 МВт при общей длине линии 50 км. При изменении мощности от 3 МВт до 6 МВт чувствительность резервной токовой защиты уменьшилась дополнительно на 27% по отношению к электросети без РГ. При уменьшении расстояния между центральной энергосистемой и местом КЗ снижение чувствительности для

принятого диапазона изменения мощности имеет аналогичную зависимость.

Зависимость коэффициента чувствительности резервной токовой защиты от вырабатываемой мощности, полученная численными расчетами, подтверждает результаты, представленные на рисунке 3. В результате РГ с соответствующим вкладом в ток КЗ непосредственно влияет на чувствительность токовой защиты. Таким образом, в ходе проведенных исследований выдвинутая гипотеза была подтверждена.

Проведено исследование ложных и неселективных срабатываний в сетях с РГ. Выявлено, что наиболее серьезное влияние распределенной генерации на ложные срабатывания происходит, когда её удаленность от общей шины менее 10% длины фидера, при условии, что параллельные фидеры имеют одинаковые характеристики. Кроме того, ложные отключения наиболее вероятны в том случае, когда место короткого замыкания находится вблизи подстанции. Поэтому необходимо согласовывать временную задержку срабатывания токовой защиты в обратном направлении потока мощности с защитой участков, где возможны ложные отключения.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе предлагается централизованная система адаптивной настройки уставок и временных задержек срабатывания токовой защиты, которая учитывает изменения, происходящие в сетях с РГ.

Содержание третьей главы раскрывает второе защищаемое положение.

Первый алгоритм разработан (рисунок 4) для определения последовательности срабатывания реле и назначения ступеней селективности с применением теории графов. Алгоритм определяет кратчайшие пути от источника к нагрузке для любой структуры сети.

Разработанный алгоритм учитывает расширение сети, добавление новых источников и нагрузок и автоматически включает их в расчеты. Это позволяет предлагаемую систему защиты выполнить универсальной и реализуемой в различных распределительных сетях.

При разработке второго алгоритма (рисунок 5) для расчета токов КЗ в электросетях с РГ в условиях меняющейся топологии электросети используются основные приемы эквивалентных преобразований. Для реализации алгоритма распределительная сеть представляется графом, как и в предыдущем случае, в качестве ребер приняты элементы, сопротивление которых необходимо учесть при расчете эквивалентного сопротивления, а в качестве вершин – точки их соединения.

Разработана программа по реализации алгоритма. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613822 «Программа для расчета токов короткого замыкания в сетях с распределенными источниками энергии».

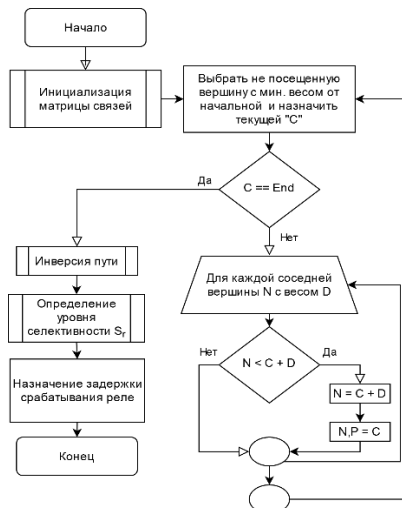


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма определения селективности токовой защиты

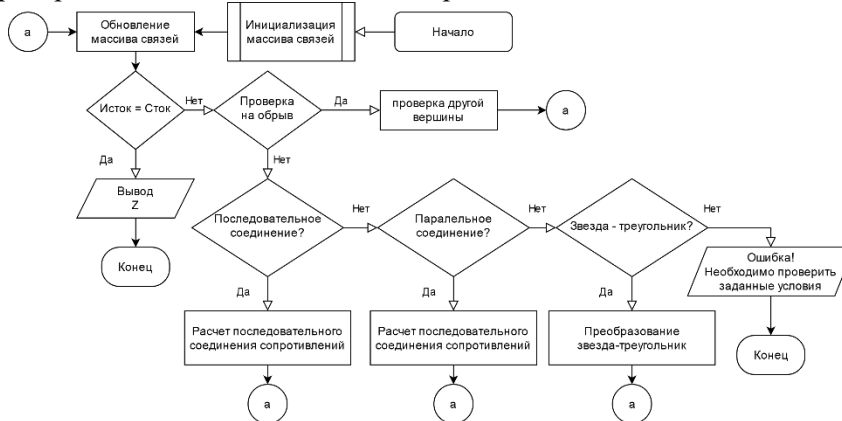


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета токов КЗ

Предложена система адаптивной токовой защиты на основе разработанных алгоритмов, которая представлена на рисунке 6. Алгоритм осуществляет проверку состояния и параметров устройств токовой защиты и распределенной генерации в сети.



Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма адаптации настроек токовой защиты

Если изменяются только параметры генераторов, то осуществляется запуск алгоритма расчета токов КЗ. Если же изменяются состояния реле, то перед расчетом токов КЗ необходимо определить новую структуру сети. Далее назначается настройка тока срабатывания соответствующему реле в распределительной сети, сохраняется и с помощью линий связи контролируется сеть, постоянно пересчитывая и обновляя параметры в зависимости от их изменения. Разработанный алгоритм определяет параметры срабатывания защиты до возникновения аварийного режима, благодаря чему не предъявляются строгие требования к линиям связи.

Ток КЗ, проходящий через реле, согласно уравнению (4), учитывает ток от каждого источника и коэффициенты воздействия, которые оказывает РГ:

$$I_r = \sum_{i=1}^m (k_{(i)r} \times I_{K3_P\Gamma(i)} \times PP_{P\Gamma(i)}) + (I_{K3_ЭC} \times PP_{ЭC}), \quad (4)$$

где m – общее число источников РГ; PP – состояние энергосистемы и генераторов (включено или выключено); $I_{K3_P\Gamma}$ – вклад в ток КЗ от источника РГ. $k_{(i)r}$ – коэффициент вклада в ток короткого замыкания от каждого источника, который выражен, как отношение тока КЗ от энергосистемы без РГ и тока КЗ с РГ, где токи КЗ определяются с помощью второго алгоритма.

Разработанные алгоритмы позволяют определить структуру распределительной сети и установить две ключевые настройки для защитных устройств, а именно величина тока срабатывания максимальной токовой защиты и время задержки отключения для обеспечения должной селективности.

В четвертой главе приведены результаты моделирования комплексной системы распределительной сети с элементами защиты. Были реализованы две имитационные модели. Первая предназначена для проверки разработанной системы адаптивной настройки уставок срабатывания токовой защиты (рисунок 7), а вторая для проверки селективности и работы алгоритма при изменении структуры сети (рисунок 8). Имитационное моделирование, представленное в этом разделе, было осуществлено с помощью пакета программного обеспечения *Matlab/Simulink*.

Результаты работы алгоритма без учета селективности защиты. Для демонстрации различных режимов работы системы токовой защиты был разработан и применен определенный сценарий моделирования, в котором в заданные промежутки времени моделируется КЗ у нагрузки, отключение от центральной энергосистемы и отключение источника РГ.

Результаты моделирования по разработанному сценарию для центральной энергосистемы и источников РГ представлены на рисунке 9.

На рисунке 9d представлен график тока, потребляемого нагрузкой *H4* и момент возникновения КЗ. Сравнивая величину тока срабатывания защиты на рисунке 9с и ток КЗ в момент времени 0.65 сек., можно сделать вывод об адекватности работы алгоритма и

отключении поврежденного участка. Ток срабатывания изменяется в соответствии с изменением общей мощности РГ в энергосистеме.

Результаты работы алгоритма адаптивной токовой защиты в смоделированной распределительной сети. Смоделированная распределительная сеть, представленная на рисунке 8, отличается от предыдущего моделирования тем, что токи КЗ могут протекать в обоих направлениях и необходимым условием селективности защиты является определение потока мощности.

Разработанная модель может принимать разные структуры в зависимости от состояния выключателей *Relay_7* и *Relay_8*. В моделируемом сценарии работы *Relay_7* разомкнут и нагрузка *H2* подключена к вышестоящей сети через *Relay_8*.

На полученных графиках источников РГ наблюдается изменение токов, протекающих на различных участках электросети при изменении режима работы, что непосредственно влияет на чувствительность токовой защиты. Обеспечение отключения токов КЗ за счет разработанного алгоритма адаптивной токовой защиты при изменении вырабатываемой мощности, представлено на рисунках 10d и 10e.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты на рисунке 10f при коротком замыкании у нагрузок *H1* и *H4* отличается незначительно. Тем не менее, отмечено заметное снижение тока срабатывания в результате отключения ветрогенератора в момент времени 0.2 сек., что снижает чувствительность токовой защиты для данного режима приблизительно на 18%.

Эффективность применения разработанных алгоритмов адаптивной токовой защиты в составе электротехнического комплекса доказывается результатами имитационного моделирования, адекватно отражающими срабатывание токовой защиты от КЗ в различных режимах работы электросети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи по обеспечению чувствительности и селективности токовой защиты электротехнического комплекса в сетях с распределенной генерацией энергии малой мощности.

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы и представлены следующие рекомендации:

1. Анализ методик построения токовой защиты традиционных электросетей показал, что внедрение распределенной генерации оказывает существенное влияние на основную и резервную защиту электросети. На основе имитационного моделирования выявлено снижение чувствительности токовой защиты дальнего резервирования, ложное срабатывание защиты при коротком замыкании на параллельном участке, нарушение селективности при изменении топологии электросети. Для конкретного примера снижение чувствительности достигает 73% в диапазоне мощности от 1 до 3 МВт и ещё на 27% при увеличении мощности до 6 МВт по отношению к настройкам срабатывания токовой защиты без распределенной генерации.

2. Определена зона подключения источника распределенной генерации к фидеру, в которой осуществляется максимальное влияние на токовую защиту дальнего резервирования. Предложены рекомендации по определению относительного местоположения распределенной генерации, позволяющие минимизировать ложные срабатывания защиты исправного участка.

3. Получена зависимость вклада в ток короткого замыкания центральной энергосистемы от изменения мощности распределенной генерации, возникающей по причине изменения режима работы возобновляемых источников электроэнергии.

4. Разработаны компьютерные модели токовой защиты и распределительной электросети с изолированной нейтралью в программной среде *Matlab/Simulink* для исследования аварийных режимов работы электротехнического комплекса на основе энергосистемы с распределенной генерацией электроэнергии.

5. Разработан алгоритм определения последовательности срабатывания реле и назначения ступеней селективности, который анализирует электросеть в соответствии с теорией графов. Алгоритм определяет кратчайшие пути от источника к нагрузке для любой структуры сети, учитывает добавление новых устройств и автоматически рассчитывает задержку времени срабатывания токовых реле.

6. Разработан алгоритм для расчета токов короткого замыкания в электросетях с распределенными источниками электроэнергии в

условиях вариативной структуры электросети, определяющий взаимные сопротивления до места короткого замыкания, на основании которых, рассчитывается суммарный вклад каждого источника в ток короткого замыкания путем пересчета матрицы начальной структуры электросети для каждого источника. Разработана программа для ЭВМ и получено свидетельство о ее государственной регистрации № 2020613822 «Программа для расчета токов короткого замыкания в сетях с распределенными источниками энергии».

7. Разработана адаптивная система токовой защиты способная следить за изменениями, происходящими в распределительной сети, приспосабливаться к расширению сети и корректировать необходимые настройки. В условиях проведенного моделирования адаптивность настроек токовой защиты предотвращает снижение её чувствительности на 18% по причине снижения вырабатываемой мощности распределенной генерации.

8. Получен акт о внедрении результатов исследований в образовательный процесс Санкт-Петербургского горного университета и справка о применении результатов исследований в производственную деятельность ООО «Невский машиностроитель».

9. Перспективы дальнейших исследований состоят: в расширение знаний о влиянии распределенной генерации на качество электроэнергии; согласованности разработанных алгоритмов с другими видами защит; разработка алгоритмов частичной децентрализации адаптивной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Смирнов, А.И. Структура токовой защиты распределительной сети на основе алгоритма поиска кратчайшего пути / А.И. Смирнов, Я.Э. Шклярский. – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 445-450.

2. Смирнов, А.И. Влияние распределенной генерации на чувствительность токовой защиты / А.И. Смирнов. – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 283-288.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

3. Ivanchenko, D. Identification of interturn faults in power transformers by means of generalized symmetrical components analysis / D. Ivanchenko, A. Smirnov. – DOI: 10.1051/e3sconf/201914004007. – Текст: электронный // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2019. – Vol. 140. – P.1-5.

4. Smirnov, A.I. Diagnostics of inter-turn short-circuit in the stator winding of the induction motor / A.I. Smirnov, I.N. Voytyuk. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012023. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 643. – №. 1. – P. 1-7.

5. Ivanchenko, D.I. Simulation of interwire short circuits in transformer windings by means of Simulink MATLAB / D.I. Ivanchenko, A.I. Smirnov. – DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657097. – Текст: электронный // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – P. 977-980.

Публикации в прочих изданиях:

6. Смирнов, А.И. Мониторинг оценки показателей качества электрической энергии / А.И. Смирнов, Я.Э. Шклярский. – Текст: непосредственный // Современная наука и практика. – 2016. – №. 8(13). – С.13-16.

Свидетельство:

7. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2020614885. Российская Федерация. Программа для расчета токов короткого замыкания в сетях с распределенными источниками энергии / А.И. Смирнов, И.Н. Войтюк, Д.И. Иванченко; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2020613822; заявл. 03.04.20; зарегистр. 29.04.2020; опубл. 29.04.2020 – 1 с.

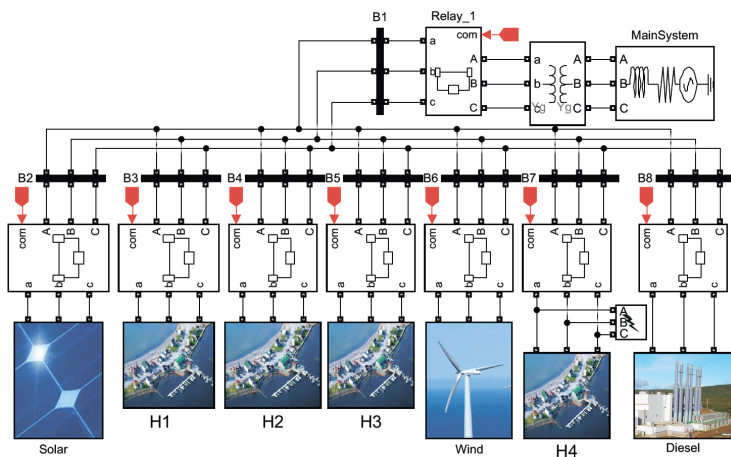


Рисунок 7 – Имитационная модель распределительной сети с одной ступенью селективности в Matlab/Simulink

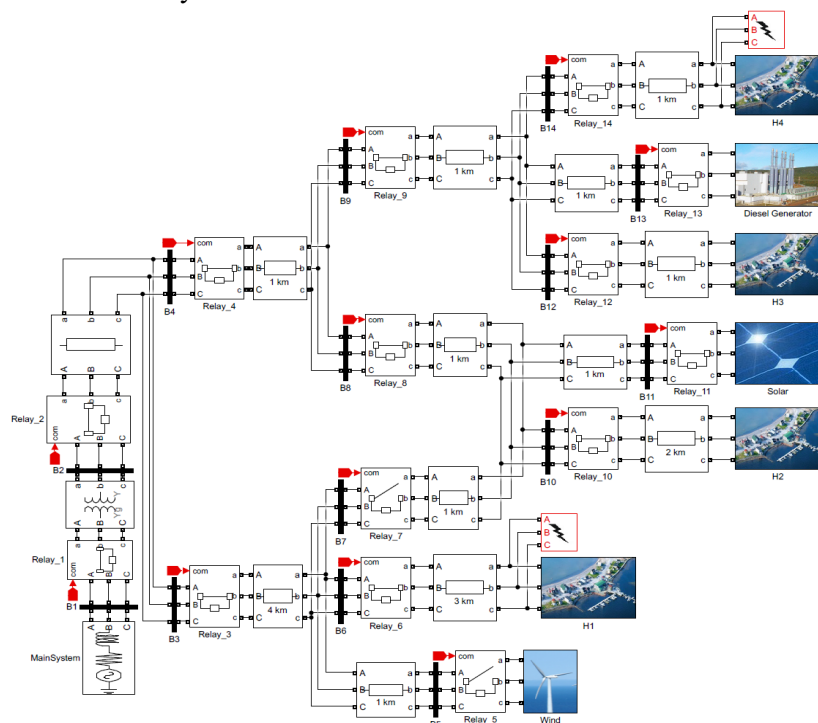


Рисунок 8 – Имитационная модель с изменяемой структурой электросети и распределенной генерацией в Matlab/Simulink

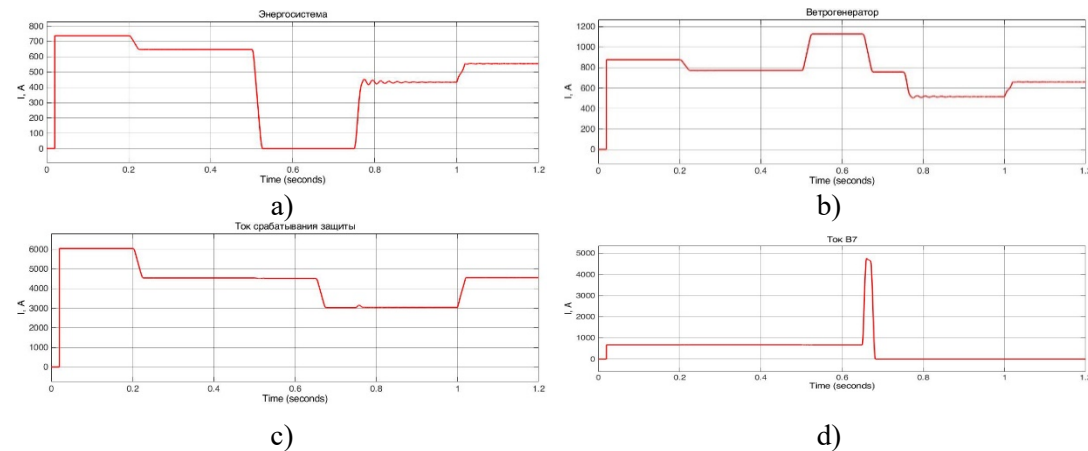


Рисунок 9 – Изменение тока при различных режимах работы электросети:
а) Энергосистема; б) Ветрогенератор; в) срабатывание защиты *H4*; д) Нагрузка *H4*

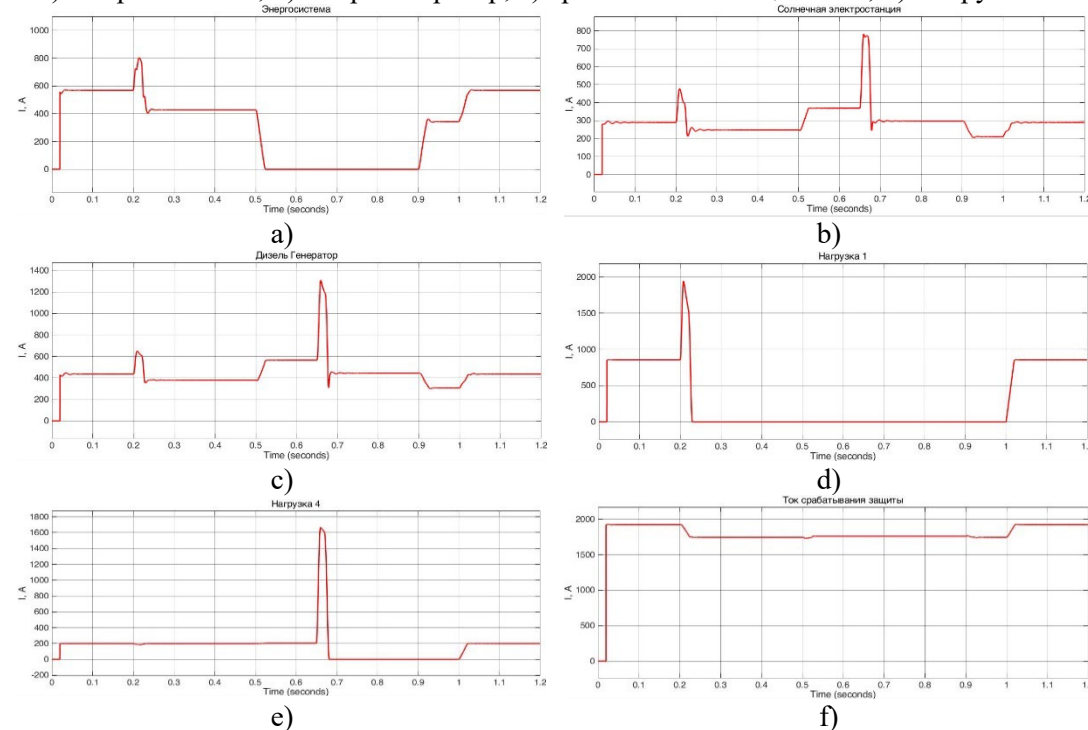


Рисунок 10 – Изменение тока согласно разработанному режиму работы электросети:
а) центральная энергосистема; б) солнечная электростанция; в) дизель-генератор;
д) нагрузка *H1*; е) нагрузка *H4*; ф) срабатывание защиты *Relay_14*